

Joni Pohjonen

# **KLORIDIEN TUNKEUTUMINEN BETO- NIIN JA NIIDEN VAIKUTUS RAUDOIT- TEIDEN KORROOSIONOPEUTEEN**

Rakennetun ympäristön tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Syyskuu 2019

# TIIVISTELMÄ

Joni Pohjonen: Kloridien tunkeutuminen betoniin ja niiden vaikutus raudoitteiden korroosionopeuteen (Chloride ingress in concrete and its effect on corrosion rate of reinforcement)

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Rakennustekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Syyskuu 2019

---

Työssä oli tarkoitus perehtyä kloridien tunkeutumiseen betoniin ja niiden vaikutukseen korroosionopeuteen. Tarkoituksena oli selvittää, millaisia malleja on käytössä ja mitä asiasta on tutkittu. Työssä käydään läpi tunkeutumiselle luotuja malleja sekä niihin liittyviä määreitä, kuten kriittisiä kloridipitoisuuksia. Kriittisistä kloridipitoisuuksista on työssä esitetty myös joitain arvoja sekä erilaisia määrittely- ja esitystapoja, joita kirjallisuudessa esiintyy.

Työssä on myös esitetty kloridien tunkeutumiseen ja korroosionopeuteen vaikuttavia tekijöitä sekä korroosion alkamisen edellytyksiä.

Avainsanat: Kloridien tunkeutuminen, Kriittinen kloridipitoisuus, korroosionopeus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. KLORIDIRASITUS .....	2
2.1 Teoriaa ja taustaa .....	2
2.2 Muut edellytykset korroosiolle .....	2
2.3 Kriittiset kloridipitoisuudet .....	3
2.3.1 Määritelmä .....	3
2.3.2 Esitystavat .....	4
2.3.3 Arvoja .....	5
3. KLORIDIEN TUNKEUTUMINEN .....	7
3.1 Kloridien kulkeutuminen betonissa .....	7
3.2 Tunkeutumiselle luodut mallit .....	7
4. RAUDOITTEIDEN KORROOSIO .....	11
4.1 Kloridirasituksen vaikutus korroosionopeuteen .....	11
4.2 Korroosionopeuteen vaikuttavia tekijöitä .....	12
5. YHTEENVETO .....	14
LÄHTEET .....	15

# 1. JOHDANTO

Betonirakenteiden kloridirasitus on Suomessa ja maailmalla hyvin tunnettu ja paljon tutkittu ilmiö. Sitä esiintyy esimerkiksi silloissa ja parkkihalleissa teiden suolauksen vuoksi. Myös uimahalleissa ja mereen tai meriveden läheisyyteen rakennettaessa tulee ottaa suunnittelussa huomioon teräsbetonin altistuminen klorideille.

Kloridirasitus aiheuttaa betonirakenteen raudoitteiden korroosiota. Jos riittävä määrä klorideja pääsee tunkeutumaan betoniin raudoitteiden syvyyteen, katoaa betonin alkalisuuden raudoitteille luoma suoja. Tällöin raudoitteiden korrosio voi alkaa, jos muut edellytykset korroosiolle ovat olemassa. Klorideista aiheutuva korrosio on yleensä pistekorrosiota. Tämän takia korrosio saattaa edetä hyvinkin pitkälle ennen kuin betonissa alkaa näkyä vaurioita pinnalla (By 42 2002, s. 24).

Kloridien tunkeutumiseen betoniin ja tunkeutumisnopeuteen vaikuttaa monta eri asiaa esimerkiksi betonin laatu, suojabetonin paksuus ja ympäristöolosuhteet (Böhni 2005, s. 6). Tämän takia sitä on vaikea arvioida. Silti, varsinkin korjausrakentamiskohteissa, tunkeutumissyvyyden arviointi on tärkeää, jotta voitaisiin arvioida, onko kriittinen kloridipitoisuus ylitetty raudoitteiden syvyydellä. Jos tunkeutumissyvyys pystytään laskemaan luotettavasti, voidaan alustavia arvioita raudoitteiden kunnosta tehdä helpommin.

Tässä työssä on tarkoitus perehtyä ja selvittää, millaisia malleja kloridien tunkeutumiselle on luotu ja mitä siitä on tutkittu. Tämän lisäksi selvitetään kloridien vaikutusta korroosionopeuteen. Ensin työssä käydään läpi kloridirasitukseen liittyvää teoriaa, kuten kriittisiä kloridipitoisuuksia. Tämän jälkeen kolmannessa luvussa käsitellään ensin kloridien tunkeutumiseen vaikuttavia tekijöitä ja sen jälkeen perehdytään tunkeutumisesta luotuihin malleihin. Neljännessä luvussa käsitellään kloridien vaikutusta raudoitteiden korroosionopeuteen. Lopuksi tärkeimmät asiat ja havainnot on koottu yhteenvetoon.

## 2. KLORIDIRASITUS

### 2.1 Teoriaa ja taustaa

Teräsbetonirakenteissa raudoitteiden korroosion kestävyys perustuu teräksen pinnalle muodostuvaan passiiviseen kerrokseen, joka hidastaa korroosionopeuden merkityksettömäksi. Passiivinen kerros syntyy betonin korkean emäksisyyden vuoksi. Käytännössä raudoitteissa ei tapahdu korroosiota niin kauan kuin tämä kerros pysyy ehjänä. (Böhni 2005, s. 1)

Raudoitteiden korroosio voi alkaa, jos raudoitteita suojeleva passiivinen kerros häviää. Yleensä passiivinen kerros menetetään karbonatisoitumisen tai kloridirasituksen takia. (Böhni 2005, s. 1) Betonin karbonatisoituminen ja altistuminen klorideille ovat yleisimmät syyt korroosion alkamiselle mutta korroosio voi myös alkaa harvinaisemmista syistä, esimerkiksi altistumisesta bromideille (Tuutti 1982, s. 24).

Kloridirasituksen seurauksena alkanut korroosio on yleensä pistekorroosiota. Karbonatisoitumisen aiheuttamaan yleiseen korroosioon verrattuna kloridien aiheuttamaa pistekorroosiota esiintyy raudoitteissa sattumanvaraisesti eri kohdissa. Toisin kuin karbonatisoitumisen aiheuttamassa yleisessä korroosiossa, jossa betonin pinta alkaa jo aikaisessa vaiheessa halkeilla ja lohkeilla, pistekorroosiossa korroosio on saattanut edetä hyvinkin syvälle ennen kuin betonin pinnalla alkaa näkyä vaurioitumista. (Böhni 2005, s. 2)

### 2.2 Muut edellytykset korroosiolle

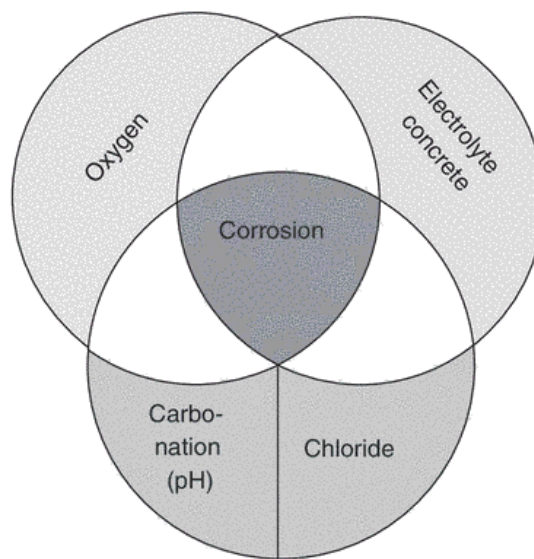
Betonin emäksisyys suojaa raudoitteita luomalla passiivisen kerroksen raudoitteiden pinnalle. Korroosio voi alkaa vasta, kun tämä kerros neutralisoituu karbonatisoitumisen seurauksena tai kloridipitoisuus ylittää kriittisen rajan raudoitteiden syvyydessä. Kriittisiä kloridipitoisuuksia tarkastellaan myöhemmin tässä työssä tarkemmin.

Passiivisen suojakalvon menetys mahdollistaa korroosion alkamisen, mutta sen lisäksi muidenkin korroosion edellytysten täytyy täytyä. Böhni (2005, s. 4) luettelee neljä ehtoa, joiden täytyy täytyä, jotta korroosiota voi tapahtua. Näitä ehtoja ovat

- anodisen reaktion mahdollisuus
- katodisen reaktion mahdollisuus
- ionien virtaus anodin ja katodin välillä

- elektronien virtauksen mahdollisuus.

Anodisen reaktion mahdollisuus täyttyy, kun raudoitteiden passiivinen kerros häviää. Katodinen reaktio mahdollistuu, kun happea on saatavilla riittävästi raudoitteiden rajapinnassa. Ionien virtaus anodin ja katodin välillä tapahtuu, jos ympäristö tai elektrolyytti johtaa riittävästi. Elektronien virtaus mahdollistuu, kun anodin ja katodin välillä on metallinen yhteys, mikä teräsbetonin tapauksessa yleensä on. (Böhni 2005, s. 4) Lisäksi tarvitaan riittävä suhteellinen kosteus, mutta tätä käydään tarkemmin läpi luvussa 4. Kuvas-  
sassa 1 on vielä havainnollistettu tarvittavia olosuhteita.



**Kuva 1.** Korroosioon vaadittavat olosuhteet (Böhni 2005, s. 4).

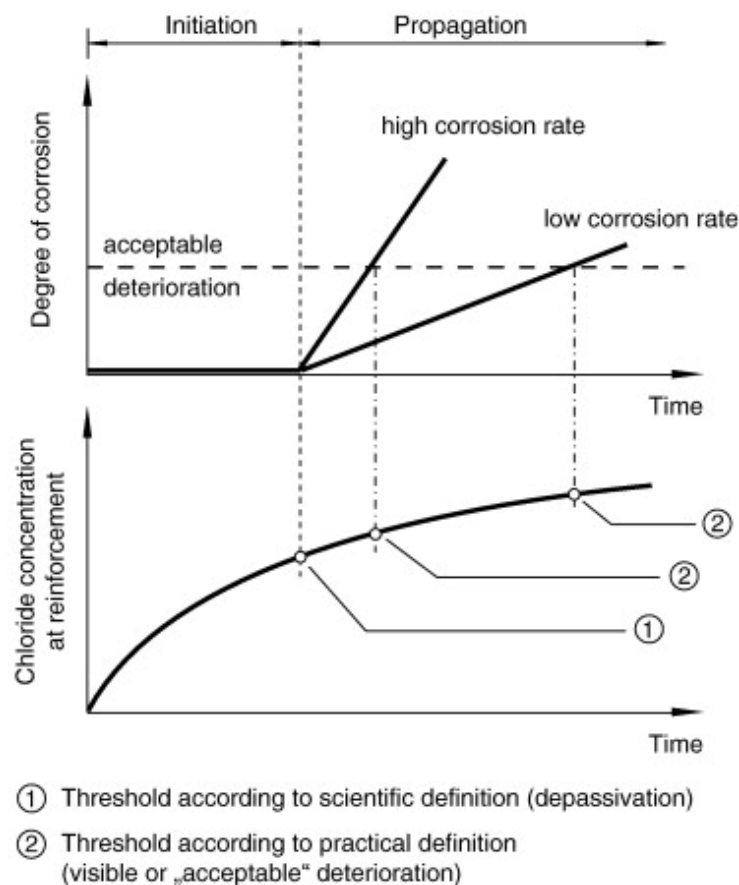
## 2.3 Kriittiset kloridipitoisuudet

### 2.3.1 Määritelmä

Aikaisemmin on todettu, että betonin raudoitteille antama passiivinen suojakalvo voi hävitä kloridirasituksen seurauksena. Jotta tämä tapahtuisi, pitää kloridipitoisuuden ylittää tietty raja raudoitteiden syvyydellä. Tätä rajaa kutsutaan kriittiseksi kloridipitoisuudeksi. (Angst et al. 2009)

Kirjallisuudessa kriittiselle kloridipitoisuudelle löytyy useita eri arvoja ja ne vaihtelevat laajalla asteikolla. Tämä johtuu osittain siitä, että kriittinen kloridipitoisuus on määritelty eri tavalla. Seuraavaksi esitetyt tavat ovat kaksi yleisintä: Ensimmäisessä tavassa kloridipitoisuus määritellään sen pitoisuuden mukaan, mikä vaaditaan raudoitteiden passiivi-

sen suojakalvon häviämiseen. Toinen tapa on käyttää kloridipitoisuutta, joka on määritetty sillä hetkellä, kun rakenteen vauriot ovat näkyviä tai hyväksyttävällä tasolla. Näistä tavoista ensimmäinen on tarkempi ja tieteellisempi. Toinen tapa antaa korkeampia arvoja kriittiselle pitoisuudelle mutta se johtuu pääasiassa siitä, että aikaa on kulunut enemmän siihen hetkeen, jolloin pitoisuus määritellään. (Angst et al. 2009) Tätä on havainnollistettu kuvassa 2, jossa Tuutin malliin on yhdistetty oletettua kloridipitoisuutta kuvaava käyrä ajan suhteen. Kuten Angst et al. (2009) toteavat ja kuvasta 2 nähdään, ei näillä kahdella eri tavalla määriteltäviä kriittisiä pitoisuuksia voida vertailla, sillä ne liittyvät eri ilmiöihin.



**Kuva 2.** Kriittisen kloridipitoisuuden määritelmät. (Angst et al. 2009)

### 2.3.2 Esitystavat

Yleisimmin kriittinen kloridipitoisuus esitetään kokonaiskloridipitoisuuden suhteena sementin painoon ja ilmoitetaan prosentteina. Tämä johtuu siitä, että kokonaiskloridipitoisuuden mittaaminen on suhteellisen yksinkertaista. Se myös sisältää betoniin sitoutuneita

den kloridien aiheuttaman korroosioriskin sekä sementin hydratoitumistuotteiden suojaavan vaikutuksen. (Ann & Song 2007, Angst et al. 2009) Muita käytettyjä tapoja ilmaista kriittinen kloridipitoisuus ovat:

- kloridi- ja hydroksyyli-ionien suhde ( $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$ )
- vapaiden kloridien pitoisuus
- kloridi- ja vetyionien suhde ( $\text{Cl}^-/\text{H}^+$ ).

Näistä vapaiden kloridien pitoisuuteen perustuvat arvot jättävät kokonaan huomioimatta betoniin sitoutuneet kloridit, jotka voivat vapautua esimerkiksi betonin pH:n laskemisen seurauksena. Se ei myöskään huomioi betonin kykyä sitoa klorideja. Sama ongelma esiintyy myös käytettäessä  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  -suhdetta, sillä sekin jättää huomioimatta betonin kyvyn sitoa klorideja. Tämän takia kokonaiskloridipitoisuutta käyttäviä kriittisiä arvoja pidetään parempina ja tarkempina. Monet standardit ilmoittavat kriittisen kloridipitoisuuden suhteessa sementin painoon mutta esimerkiksi Glass & Buenfeld (1997), Glass et al. (2000) ja Sergi & Glass (2000) ovat esittäneet, että  $\text{Cl}^-/\text{H}^+$  -suhde olisi parempi tapa ilmaista kriittistä kloridipitoisuutta. Tämä kuitenkin vaatii lisää tutkimuksia. (Ann & Song 2007, Angst et al. 2009)

### 2.3.3 Arvoja

Kirjallisuudessa esiintyvät arvot vaihtelevat paljon. Syitä tähän ovat erilaiset esitystavat ja määritelmät, joita käytiin läpi aikaisemmin. Lisäksi tuloksiin vaikuttavat koejärjestelyt sekä useat muuttujat, jotka vaikuttavat kloridien tunkeutumiseen (Angst et al. 2009). Kun käytetään kokonaiskloridien suhdetta sementin painoon, saadaan kriittiselle kloridipitoisuudelle kirjallisuudessa arvoja väliltä 0,04% - 8,34%. Jos taas käytetään  $\text{Cl}^-/\text{OH}^-$  -suhdetta arvot vaihtelevat välillä 0,01-45. (Angst et al. 2009) Koska kriittiseen pitoisuuteen vaikuttaa monta muuttujaa, on kriittiselle kloridipitoisuudelle vaikea löytää yksittäistä arvoa tai vakioarvoa (Böhni 2005, s. 26-27). Toisaalta Sergi & Glass (2000) ovat saaneet useammalla eri sementtityypillä  $\text{Cl}^-/\text{H}^+$  -suhteeksi suurin piirtein 0,01. Tämä tapa vaatii kuitenkin edelleen lisää tutkimista.

Kriittiselle kloridipitoisuudelle on vaikea antaa yksittäistä arvoa, koska tutkimuksissa saadut arvot vaihtelevat hyvin paljon ja niitä on vaikea verrata keskenään. Tarkkoja yleispäteviä arvoja on siis vaikea esittää. Kuitenkin joitain karkeita rajoja voidaan antaa, joilla voidaan arvioida korroosion mahdollisuutta. Böhnin (2005, s. 27) kirjassa mainitaan, että



monissa maissa saatujen kokemusten mukaan seuraava yhteys voidaan esittää kloridipitoisuuden ja korroosioriskin välillä. Arvot on esitetty kloridipitoisuutena sementin painon suhteen.

- < 0,2 M% alhainen korroosio riski
- 0,4 M% pieni korroosioriski
- > 1,0 M% suuri korroosio riski

Myös standardeissa ja ohjeissa on esitetty kriittiselle kloridipitoisuudelle arvoja. Nämä arvot eivät kuitenkaan ole varsinaisia kriittisiä kloridipitoisuuksia vaan lähinnä hyväksyttäviä kloridipitoisuuksia käytännönohjeiksi tuoreen betonin valmistukseen. (Angst et al. 2009) Esimerkkeinä näistä on esimerkiksi eurooppalainen standardi EN-206-1 ja Betoninormit 2012 by50. By 50 (2011, s. 112) antaa kloridipitoisuudelle taulukossa 1 esitetyt arvot.

Taulukko 1. *Betonin suurin sallittu kloridipitoisuus by50 mukaan*

Betonin käyttö	Kloridiluokka	Suurin sallittu Cl <sup>-</sup> määrä [paino %] sementin määrästä
Raudoittamaton betoni, joka ei sisällä muitakaan metalliosia, lukuunottamatta korroosionkestäviä nostoelimiä.	Cl 1,0	1,0
Raudoitettu betoni tai muita metalliosia sisältävä betoni	Cl 0,2	0,2
Jännitetty betoni	Cl 0,2	0,2

Näiden lisäksi esimerkiksi By 42 (2002, s. 23) mukaan kriittinen kloridipitoisuus on välillä 0,03-0,07 p-% betonin painosta. Näitä arvoja voidaan käyttää apuna korjausrakentamisessa, kun arvioidaan korroosion alkamista. Arvoissa tulee huomioida, että ne on annettu betonin painon suhteen eikä sementin painon.

### 3. Kloridien tunkeutuminen

#### 3.1 Kloridien kulkeutuminen betonissa

Käytännön tapauksissa kloridit kulkeutuvat betonissa pääasiassa kahdella eri tavalla. Nämä tavat ovat kapillaari-imu ja diffuusio. Yleensä tavallisimmissa tapauksissa molemmat tavat osallistuvat kloridien kuljettamiseen mutta esimerkiksi täysin vedellä kyllästyssä betonissa diffuusio on ainoa kulkeutumistapa. Näistä kahdesta tavasta kapillaari-imu on huomattavasti nopeampi kulkeutumistapa klorideille mutta se on yleensä hallitseva vain betonin pintakerroksissa. Kun mennään syvemmälle betoniin, diffuusiosta tulee hallitsevampi kulkeutumistapa. (Böhni 2005, s. 15)

Kloridien tunkeutumista voi nopeuttaa betonissa esiintyvät halkeamat, joissa kloridit pääsevät kulkemaan nopeasti ja helpommin syvemmälle betoniin. Myös betonin altistuminen jatkuvalla kuivumis-kastumis-kierrolle nopeuttaa kloridipitoisuuden nousua betonissa. (Böhni 2005, s. 13,24)

#### 3.2 Tunkeutumiselle luodut mallit

Suurin osa malleista, joita käytetään arvioimaan kloridien aiheuttaman korroosion alkamista, perustuu samalle konseptille. Mallit perustuvat kloridipitoisuuden arvioimiseen raudotteiden syvyydellä tietyn ajan kuluessa ja sen pitoisuuden vertaamiseen kriittiseen kloridipitoisuuteen, joka määrittää korroosion alkamisrajan. (Angst 2019) Kriittisen kloridipitoisuuden määrittelyä ja siihen liittyviä asioita käytiin läpi aikaisemmin tässä työssä. Tässä luvussa käydään läpi malleja, joiden avulla voidaan kloridipitoisuutta arvioida tietyllä syvyydellä.

Monet kloridien tunkeutumista kuvaavat mallit perustuvat Fickin toiseen lakiin (Böhni 2005, s. 29). Yksi eniten käytetyistä ja yksinkertaisimmista malleista on niin sanottu virhefunktio (error function) sovellutus Fickin toisesta laista (Angst 2019). Tämä ratkaisu on esitetty kaavassa 1,

$$C(x, t) = C_0 + (C_s - C_0) \left[ 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{app} \times t}} \right] \quad (1)$$

missä

- $C(x, t)$  = kloridipitoisuus syvyydellä  $x$  altistumisajassa  $t$  [p-% sementin määrästä]
- $C_0$  = lähtökloridipitoisuus betonissa [p-% sementin määrästä]

- $C_s$ = näennäinen kloridipitoisuus betonin pinnalla (oletetaan yleensä vakioksi) [p-% sementin määrästä]
- $D_{app}$ = näennäinen kloridien diffuusiokerroin [ $m^2/s$ ]
- erf= virhefunktio (error function)
- $x$ = syvyys [m]
- $t$ = altistumisaika (ikä) [s].

Usein  $D_{app}$  esitetään altistumisaajan funktiona kaavan 2 mukaan.

$$D_{app}(t) = D_{app,0} \times \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \quad (2)$$

Missä

- $D_{app,0}$ = diffuusiokerroin vertailu hetkellä [ $m^2/s$ ]
- $t_0$ = vertailu ikä
- $n$ = ikääntymisekspONENTTI.

Kaavaa 2 käytetään, jotta pystytään huomioimaan, että kloridit tunkeutuvat betoniin nopeammin betonin nuorella iällä. Toisin sanoen kloridien tunkeutuminen betoniin hidastuu betonin vanhetessa. (Angst 2019) Vaikka kaava 1 on yksi yleisimmin käytetyistä malleista, ei se ole aivan yksiselitteinen. Esimerkiksi Böhni (2005, s. 29) esittää saman kaavan käyttäen tehokasta diffuusiokerrointa eli  $D_{eff}$ . Näiden lisäksi kirjallisuudessa esiintyy useita erilaisia versioita diffuusiokertoimesta. Näitä ovat esimerkiksi oikea diffuusiokerroin  $D$ , muuttumattomana pysyvä (steady state)  $D_{ss}$ , muuttuva (non-steady state)  $D_{nss}$  ja potentiaalinen diffuusiokerroin  $D_p$ . Lisäksi on olemassa vielä muitakin määrittelyitä diffuusiokertoimelle. Yhtenäistä määritelmää on pyritty saamaan aikaiseksi. (Böhni 2005, s. 100)

Edellä esitetty kaava 1 antaa jonkinlaisen karkean arvion kloridipitoisuudesta ja on suhteellisen yksinkertainen käyttää. Se kuitenkin huomioi vain diffuusiona tapahtuvan kloridien tunkeutumisen. Mutta kuten aikaisemmin luvussa 3.1 mainittiin, tapahtuu tunkeutumista myös kapilaari-imun toimesta erityisesti pintakerroksissa. Näin ollen ei kloridien tunkeutumista voi arvioida pelkästään diffuusion perusteella, jos halutaan lähemmäs todellisuutta vastaavia tuloksia. Useasti betoni altistuu myös kuivumis-kastumis-kierrolle, joka nopeuttaa kloridipitoisuuden nousua betonissa. Kaava 1 ei myöskään huomioi tätä ilmiötä.

Helpoin tapa ottaa huomioon kapillaari-imu sekä esimerkiksi kuivumis-kastumis-kierto on ottaa käyttöön niin sanottu konvektiovyöhyke (convection zone)  $\Delta x$ . Tällä vyöhykkeellä ajatellaan kapillaari-imun olevan hallitseva siirtymismuoto, kun taas vyöhykkeen jälkeen syvemmällä betonissa se on diffuusio. (Böhni 2005, s. 98) Konvektiovyöhykkeen syvyyteen vaikuttaa ympäristön olosuhteet, kuivumis-kastumis-kierron aika ja betonin ominaisuudet. Konvektiovyöhykkeen syvyys ei ole pysyvä, vaan siihen vaikuttaa esimerkiksi edellä mainitut asiat. Tämän takia kirjallisuudessa annettuja konvektiovyöhykkeen arvoja on vaikea käyttää varsinkin, jos olosuhteet eroavat annettujen arvojen olosuhteista. Tämän takia onkin suositeltavaa määrittää konvektiovyöhyke mittausten avulla. Jotta tämä olisi mahdollista pitää mittausdataa olla saatavilla, minkä takia menetelmä ei sovi kovin hyvin uusille rakenteille. (Liu et al. 2016) Böhni (2005, s. 99-100) esittää konvektiovyöhykkeen syvyydestä seuraavia havaintoja: Kun vesi-sementti suhde kasvaa 1/10, johtaa se noin 2 mm konvektiovyöhykkeen syvyyden kasvuun ja jopa alhaisella 0,30 vesi-sementti suhteella ainakin 2-3 mm konvektiovyöhykettä tulee odottaa. Mutta kuten luvussa on käyty läpi, vaikuttaa konvektiovyöhykkeen syvyyteen niin monta muutujaa, että kannattaa tapauskohtaisesti arvioida mitä arvoja käyttää.

Kun konvektiovyöhyke halutaan ottaa huomioon laskennassa, voidaan kaava 1 muokata lisäämällä sinne konvektiovyöhykkeen termi. Liu et al. (2016) esittävät kaavassa 3 esitetyn version virhefunktio sovellutuksesta.

$$C(x, t) = C_0 + (C_s - C_0) \left[ 1 - \operatorname{erf} \frac{x - \Delta x}{2 \times \sqrt{D \times t}} \right] \quad (3)$$

Missä,

- $C(x, t)$  = kloridipitoisuus syvyydellä  $x$  altistumisajassa  $t$  [p-% sementin määrästä]
- $C_0$  = lähtökloridipitoisuus betonissa [p-% sementin määrästä]
- $C_s$  = näennäinen kloridipitoisuus betonin pinnalla (oletetaan yleensä vakioksi) [p-% sementin määrästä]
- $D$  = kloridien diffuusiokerroin [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
- $\operatorname{erf}$  = virhefunktio (error function)
- $x$  = syvyys [m]
- $t$  = altistumisaika (ikä) [s]
- $\Delta x$  = konvektiovyöhykkeen syvyys [m].

Böhni (2005, s. 115) esittää kaavasta 3 myös toisenlaisen version. Tämä versio on esitetty kaavassa 4.

$$C(x, t) = C_i + (C_{\Delta x} - C_i) \times \operatorname{erf} \left[ 1 - \frac{x - \Delta x}{2 \times \sqrt{(t - t_{exp}) \times D_{app}(t)}} \right] \quad (4)$$

Missä,

- $C(x,t)$ = kloridipitoisuus syvyydellä  $x$  iässä  $t$  [p-% sementin määrästä]
- $C_i$ = lähtökloridipitoisuus betonissa [p-% sementin määrästä]
- $C_{\Delta x}$ = kloridipitoisuus syvyydellä  $\Delta x$  (oletetaan pysyvän samana ajan kuluessa) [p-% sementin määrästä]
- $D_{app}$ = ajasta riippuva näennäinen kloridien diffuusiokerroin [ $m^2/s$ ] (kts. kaava 2)
- $t_{exp}$ = aika ensimmäiseen kloridialtistumiseen saakka [s]
- $t$ = betonin ikä [s]
- $erf$ = virhefunktio (error function).

Kuten yllä nähdään, on kaavoista olemassa erilaisia versioita ja tulkintoja. Siitä huolimatta molempien kaavojen toimivuuden kannalta on tärkeää tietää luotettavasti konvektiovyöhykkeen syvyys  $\Delta x$ , diffuusiokerroin  $D$  ja kloridipitoisuus  $C_s$  tai  $C_{\Delta x}$ , jos halutaan mahdollisimman tarkkoja tuloksia (Böhni 2005, s. 93, Liu et al. 2016).

Fickin toiseen lakiin perustuvat mallit ovat hyvin suosittuja, vaikka monimutkaisemmilla malleilla voitaisiin mahdollisesti saavuttaa tarkempia tuloksia. Monet laskutavoista ja testausmenetelmistä on edelleen tutkimuksen alaisina, sillä niiden toimivuutta ei ole pystytty vielä arvioimaan ja vahvistamaan pitkällä aikavälillä. Sen takia tuloksia kannattaa käyttää ennemmin arvioinnin apuna kuin tarkkana matemaattisena totuutena. (Andrade et al. 2013)

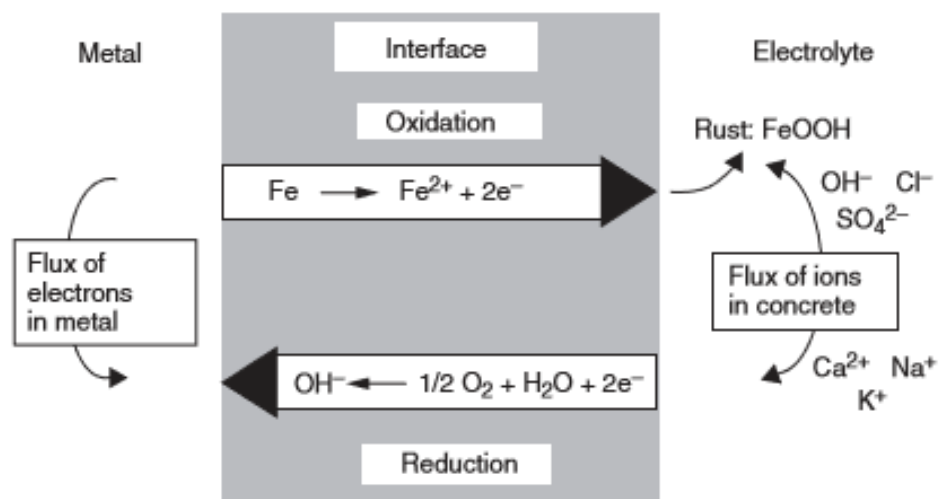
## 4. RAUDOITTEIDEN KORROOSIO

### 4.1 Kloridirasituksen vaikutus korroosionopeuteen

Metalleilla on luontainen kyky muodostaa ioneita, minkä takia ne ovat alttiita korroosiolle. Korroosio on sähkökemiallinen prosessi, jossa betoniteräksen tapauksessa tapahtuu seuraavat reaktiot:

- Anodin reaktio:  $2\text{Fe} \rightarrow 2\text{Fe}^{2+} + 4\text{e}^-$
- Katodin reaktio:  $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$
- Reaktioiden summa:  $2\text{Fe} + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}(\text{OH})_2$  (Böhni 2005, s. 2, 72-73)

Kuvassa 3 on havainnollistettu näitä reaktioita ja sähkökemiallista prosessia.

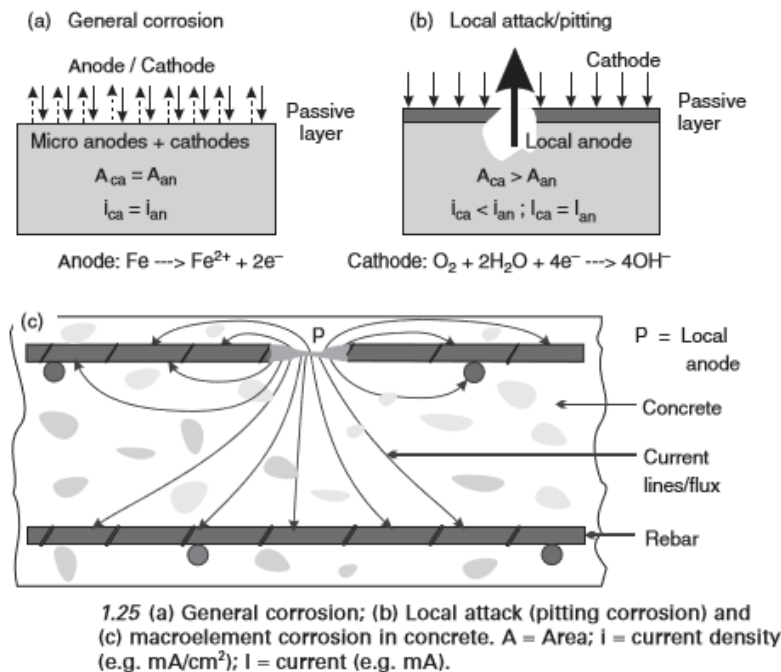


**Kuva 3.** Korroosion sähkökemiallinen prosessi (Böhni 2005, s. 5)

Reaktioista nähdään, että anodilla raudoitteiden pinnasta liukenee materiaalia, jonka seurauksena raudoitteiden poikkileikkausala pienenee. Korroosion seurauksena syntyy korroosiotuotteita, joiden tilavuus on suurempi kuin alkuperäisten materiaalien. Tämän seurauksena betoniin syntyy halkeamia ja lohkeamia. (By 42 2002, s. 19-20)

Kloridirasitus aiheuttaa pistekorroosiota. Pistekorroosiossa anodi ja katodi alueet ovat makroskooppisia ja pysyvät paikoillaan. Raudoitteisiin syntyy pieni paikallinen anodi, joka on yhteydessä suureen katodiseen alueeseen. Tämä aiheuttaa suuremman korroosionopeuden, minkä takia kloridien aiheuttama korroosio on karbonatisoitumisen aiheuttamaa yleistä korroosiota nopeampaa. Yleisessä korroosiossa anodi ja katodi alueita ei

pysty havaitsemaan silmillä, sillä ne ovat mikroskooppisia. Tämän lisäksi alueet vaihtelevat satunnaisesti ympäri raudotteita. Koska anodi ja katodi ovat suhteellisen pieniä ja saman kokoisia, on yleinen korroosio hitaampaa kuin kloridien aiheuttama pistekorroosio. (Böhni 2005, s. 75) Kuvassa 4 on vielä havainnollistettu korroosio ilmiötä.



**Kuva 4.** Yleisen ja pistekorroosion eroavaisuudet (Böhni 2005, s. 30)

Kloridit eivät itse vaikuta varsinaiseen korroosion sähkökemialliseen reaktioon paljoakaan mutta ne mahdollistavat korroosion alkamisen alemmassa kosteuspitoisuudessa ja lämpötilassa. Tämän lisäksi ne helpottavat korroosiotuotteiden liukenemista betonin huokosveteen, jolloin kestää kauemmin ennen kuin vauriot alkavat näkyä betonin pinnalla. Sen takia korroosio saattaa edetä hyvinkin pitkälle ennen havaitsemista. Myös karbonatisoituminen nopeuttaa kloridikorroosiota. (By 42 2002, s. 24)

Jos betonin suhteellinen kosteus vaihtelee välillä 50-99 %, karbonatisoitumisen aiheuttaman korroosion arvot vaihtelevat välillä 1-50  $\mu\text{m}/\text{vuosi}$  ja kloridien aiheuttaman korroosion arvot välillä 9-122  $\mu\text{m}/\text{vuosi}$ . Riippumatta mittaustavasta voidaan sanoa, että kloridien aiheuttaman pistekorroosion nopeus on 4-8 kertaa suurempi kuin keskimääräinen laskettu pinta korroosion nopeus. (Böhni 2005, s. 74)

## 4.2 Korroosionopeuteen vaikuttavia tekijöitä

Korroosionopeuteen vaikuttaa useita eri tekijöitä. Näistä tärkeimpiä ovat seuraavat:

- kosteuspitoisuus
- lämpötila
- kloridipitoisuus
- betonin tiiveys
- suojabetonin paksuus

Kosteuspitoisuudella on suuri vaikutus korroosionopeuteen. Korroosion alkamiseen tarvitaan yleensä 65-70 % suhteellinen kosteus. Suhteellisen kosteuden kasvaessa myös korroosionopeus kasvaa. Suhteellisen kosteuden kasvaessa yli 80-85 % korroosionopeus kasvaa merkittävästi ja suurin nopeus saavutetaan yleensä noin 95 % suhteellisessa kosteudessa. Tämän jälkeen nopeus laskee, kun lähestytään 100 % RH:ta. Korroosionopeus laskee, sillä huokosverkoston täytyessä vedellä, hapen diffuusio pienenee, jolloin happea ei riitä korroosioreaktioihin. Tämä tosin edellyttää, että betoni on jatkuvasti märkää. (By 42 2002, s. 24, Böhni 2005, s. 74)

Lämpötila vaikuttaa betonin ominaisvastukseen ja sen takia myös korroosionopeuteen. Lämpötilan kasvaessa myös korroosionopeus kasvaa. (By 42 2002, s. 24, Böhni 2005, s. 36) Koko rakenteen kannalta ajateltuna, betonin tiiveys vaikuttaa korroosionopeuteen pidentämällä korroosion käynnistymisvaiheeseen kuluvaan aikaan, sillä tiiviimpi betoni hidastaa karbonatisoitumista ja kloridien tunkeutumista raudoitteiden syvyyteen. Itse korroosioreaktioon se vaikuttaa vähentämällä hapen diffuusiota ja sitä kautta reaktiolla käytössä olevaa happea. Suojabetonin paksuudella on samanlainen vaikutus kuin betonin tiiveydellä. Paksumpi suojabetonikerros pidentää korroosion käynnistymisaikaa, sillä karbonatisoitumisen ja kloridien pitää edetä paksumman kerroksen läpi ennen kuin ne saavuttavat raudoitteet, mikä on hitaampaa. Tämän lisäksi suojabetonin paksuus vaikuttaa kosteuspitoisuuteen ja saatavilla olevan hapen määrään, mikä taas vaikuttaa korroosioreaktion nopeuteen. (By 42 2002, s. 19, 24-25, Böhni 2005, s. 7)



## 5. YHTEENVETO

Yhteenvetona voidaan todeta, että huolimatta vuosikymmenien ajan tehdyistä tutkimuksista, on kloridien aiheuttamassa korroosiossa paljon asioita, joita ei täysin ymmärretä. Tämän johtaa siihen, että monet mallit ovat enemmän suuntaa antavia, eivätkä ne kuvaa kovin tarkasti todellisuutta. Osittain tämä johtuu myös siitä, että laskukaavojen kannalta tärkeiden muuttujien määrittelyistä ei ole päästy yhteisymmärrykseen, minkä takia niille esiintyy kirjallisuudessa useita erilaisia määritelmiä. Esimerkkinä voidaan mainita diffuusiokerroin, jonka erilaisia määritelmiä luettiin aikaisemmin tässä työssä. Myös kriittisellä kloridipitoisuudella on eri määritelmiä, minkä lisäksi sillä on useita esitystapoja. Siihtäkin huolimatta, että se on kaikkien käytössä olevien mallien kannalta erittäin tärkeä tieto.

Kloridien aiheuttaman korroosion alkamista voidaan arvioida selvittämällä kloridipitoisuus raudotteiden syvyydellä ja vertaamalla sitä kriittiseen kloridipitoisuuteen. Tällä hetkellä käytössä olevat mallit, joilla kloridien tunkeutumista ja pitoisuutta lasketaan, perustuvat Fickin toiseen lakiin. Näistä yksi yksinkertaisimmista ja käytetyimmistä on virhefunktio-versio (kaava 1), joka voidaan muokata myös huomioimaan kapillaari-imu diffuusion lisäksi. Tämä onnistuu lisäämällä kaavaan konvektiovyöhykkeen huomioivan termin, jolloin kaavasta saadaan vähäsen tarkempi. Tulosten tarkkuuteen vaikuttaa hyvin paljon käytetty diffuusiokerroin, konvektiovyöhykkeen arvo ja kloridipitoisuuden määrittäminen pinnalla tai konvektiovyöhykkeen syvyydellä.

Itse korroosio on nopeampaa kloridien aiheuttamana verrattuna karbonatisoitumisen aiheuttamaan korroosioon. Kloridien aiheuttama pistekorroosiossa katodi on huomattavasti suurempi kuin anodi, mikä on suurin syy siihen, että se on nopeampaa. Tämän lisäksi kloridit liuottavat korroosiotuotteita, mikä edesauttaa korroosiota. Kloridit myös mahdollistavat korroosion alkamisen alemmassa kosteuspitoisuudessa. Korroosioreaktion nopeuteen vaikuttaa voimakkaasti myös suhteellinen kosteus ja lämpötila. Näiden lisäksi myös useat muut tekijät vaikuttavat korroosion nopeuteen.

Kaiken kaikkiaan kloridien tunkeutumiseen ja korroosionopeuteen vaikuttaa useita eri muuttujia aina ympäristöolosuhteista, betonin laadusta ja vesi-sementti suhteesta suhteelliseen kosteuteen. Tämän takia ilmiössä riittää tutkittavaa, jotta malleja voidaan parantaa ja kriittisiä kloridipitoisuuksia tarkentaa.

## LÄHTEET

- Andrade, C., Prieto, M., Tanner, P., Tavares, F. & d'Andrea, R. 2013, *Testing and modelling chloride penetration into concrete*.
- Angst, U.M. 2019, "Predicting the time to corrosion initiation in reinforced concrete structures exposed to chlorides", *Cement and Concrete Research*, vol. 115, pp. 559-567.
- Angst, U., Elsener, B., Larsen, C.K. & Vennesland, Ø 2009, "Critical chloride content in reinforced concrete — A review", *Cement and Concrete Research*, vol. 39, no. 12, pp. 1122-1138.
- Ann, K.Y. & Song, H. 2007, "Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete", *Corrosion Science*, vol. 49, no. 11, pp. 4113-4133.
- Böhni, H. 2005, *Corrosion in Reinforced Concrete Structures*, Elsevier Science & Technology, Cambridge.
- Glass, G.K. & Buenfeld, N.R. 1997, *The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete*.
- Glass, G.K., Reddy, B. & Buenfeld, N.R. 2000, *Corrosion inhibition in concrete arising from its acid neutralisation capacity*.
- Liu, P., Yu, Z., Lu, Z., Chen, Y. & Liu, X. 2016, *Predictive convection zone depth of chloride in concrete under chloride environment*.
- Pentti, M., Pentti, M., Mattila, J., Lahdensivu, J. & Haukijärvi, M. 2002, *Betonijulkisivun kuntotutkimus 2002*. Suomen betoniyhdistys, Helsinki.
- Sergi, G. & Glass, G.K. 2000, *A method of ranking the aggressive nature of chloride contaminated concrete*.
- Suomen betoniyhdistys 2011, *Betoninormit 2012*, BY-Koulutus, Helsinki.
- Tuutti, K. 1982, *Corrosion of steel in concrete*, Cement- och betonginstitutet.